



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA TEPELNĚ OVLIVNĚNÉ POVRCHOVÉ VRSTVY  
PO BROUŠENÍ LOŽISKOVÝCH KROUŽKŮ**

AN ANALYSIS OF THE HEAT-AFFECTED SURFACE LAYER AFTER GRINDING OF THE BEARING RINGS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Timotej Filípek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

**BRNO 2019**

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Timotej Filípek**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Analýza tepelně ovlivněné povrchové vrstvy po broušení ložiskových kroužků**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Bakalářská práce je zaměřena na analýzu kvality povrchové vrstvy po broušení ložiskových kroužků. Součástí práce bude charakteristika technologie broušení, popis procesních kapalin a budou popsány příčiny vzniku tepelně ovlivněné vrstvy po technologii broušení. Experimentální část bude zaměřena na analýzu tepelně ovlivněné povrchové vrstvy.

#### **Cíle bakalářské práce:**

1. Charakteristika technologie broušení.
2. Charakteristika procesních kapalin.
3. Příčiny vzniku tepelně ovlivněné povrchové vrstvy.
4. Experimentální část.
5. Vyhodnocení experimentální části

#### **Seznam doporučené literatury:**

FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.

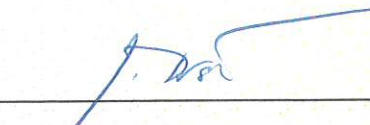
PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.

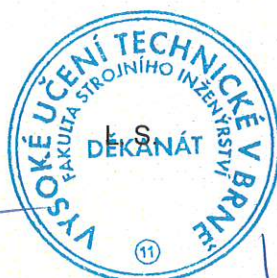
PÍŠKA, M. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 26. 10. 2018

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cieľom tejto bakalárskej práce je stanovenie príčin vzniku popálenín na povrchovej vrstve obrobku po brúsení a ich eliminácia. Prvá časť sa zaoberá charakteristikou technológie brúsenia, typmi brúsiek a brúsnymi nástrojmi. Druhá časť sa venuje charakteristike procesných kvapalín, ich využitím a vhodnosti voľby v závislosti od rezných podmienok a materiálu. V tretej časti sa pojednáva o tom, čo je popálenina, príčina jej vzniku a následná eliminácia tohto nežiaduceho javu. Experimentálna časť, ktorá bola vykonaná vo firme Schaeffler Skalica, spol. s r.o. sa zaoberá vznikom tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy z dôvodu nevhodných zrovnávacích brúsiacich parametrov a nevhodne zvolených intervalov medzi zrovnávaniami brúsiaceho kotúča. Počas vykonávania experimentálnej časti boli použité dva rôzne brúsiace kotúče, ktoré boli následne tiež porovnané z hľadiska vhodnosti na daný obrábací proces. Záverečná časť je vyhodnotením experimentálnej časti a zhrnutím poznatkov tejto problematiky.

## Kľúčové slová

brúsenie, obrobok, brúsny kotúč, procesná kvapalina, popálenina

## ABSTRACT

The object of this bachelor thesis is a determination of the causes of burns origin at the surface layer of a workpiece after a grinding process and their elimination. The first chapter is focused on the description of the grinding technology, grinder types and grinding tools. The second chapter deals with the characterisation of the process fluids, their use and suitability depending on the cut conditions and the material. The third chapter explains what a burn is, the causes of its origin and the ways of subsequent elimination of this adverse event. The experimental part – performed in the Schaeffler Skalica, spol. s r.o. company – deals with the origin of the heat affected surface layer due to improper dressing grinding parameters and improper choice of intervals between dressing processes of the grinding wheel. At the experiment two different grinding wheels were used; subsequently, they were compared to each other from the point of view of suitability for the machining process. The final chapter comprises the experimental part assessment and a summary of the findings in this topic.

## Key words

grinding, workpiece, grinding wheel, process fluid, burn

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

FILÍPEK, Timotej. *Analýza tepelně ovlivněné povrchové vrstvy po broušení ložiskových kroužků*. Brno 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 40 s. Ing. Aleš Jaroš PhD.

**PREHLÁSENIE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Analýza tepelně ovlivněné povrchové vrstvy po broušení ložiskových kroužků** vypracoval/la samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Timotej Filípek

## POĎAKOVANIE

Touto cestou by som sa rád poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce pánovi Ing. Alešovi Jarošovi, Ph.D., za nespočetné rady a čas, ktorý mi venoval. Ďalej by som chcel poďakovať pánovi Ing. Rastislavovi Chovancovi, ktorý mi zabezpečil vypracovanie experimentálnej časti vo firme Schaeffler Skalica, spol. s r.o. a za jeho pomoc pri celkovom vypracovaní práce. Na záver by som rád poďakoval svojej rodine a všetkým, ktorí mi pomohli v štúdiu.

**OBSAH**

|   |    |
|---|----|
| ABSTRAKT .....  | 3  |
| ABSTRACT.....   | 3  |
| PREHLÁSENIE.....  | 5  |
| POĎAKOVANIE .....   | 6  |
| OBSAH.....  | 7  |
| ÚVOD.....   | 9  |
| 1 Charakteristika technológie brúsenia.....   | 10 |
| 1.1 Proces technológie brúsenia.....  | 10 |
| 1.1.1 História brúsenia .....   | 10 |
| 1.1.2 Kinematika brúsenia .....   | 11 |
| 1.2 Typy brúsiek .....  | 12 |
| 1.2.1 Stojanová brúska.....   | 12 |
| 1.2.2 Hrotová brúska.....   | 12 |
| 1.2.3 Bezhrtová brúska .....  | 13 |
| 1.2.4 Rovinná brúska .....  | 14 |
| 1.2.5 Otvorová brúska.....  | 14 |
| 1.3 Druhy BK podľa tvaru .....  | 14 |
| 1.4 Materiály BK .....  | 15 |
| 1.4.1 Materiály brusív .....  | 15 |
| 1.4.2 Materiály spojív .....  | 16 |
| 1.5 Vyvažovanie BK.....   | 16 |
| 1.6 Zrovnávanie BK.....   | 17 |
| 1.7 Označovanie BK.....   | 17 |
| 2 Charakteristika procesných kvapalín .....   | 19 |
| 2.1 Charakteristika procesných kvapalín .....   | 19 |
| 2.2 Základné rozdelenie procesných kvapalín .....   | 19 |
| 2.3 Voľba procesnej kvapaliny .....   | 20 |
| 3 príčiny vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy .....                                    | 22 |
| 3.1 Príčiny vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy.....                                   | 22 |
| 3.1.1 Nevhodné rezné podmienky vedúce k vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstve.....       | 22 |
| 3.1.2 Nevhodnosť procesnej kvapaliny vedúca k vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstve..... | 23 |
| 3.1.3 Vznik tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy z dôvodu nevhodného brúsiaceho nástroja.....  | 24 |



|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.2 | Eliminácia tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy ..... | 25 |
| 4   | experimentálna časť .....                              | 27 |
| 4.1 | Schaeffler, spol. s r.o. ....                          | 27 |
| 4.2 | Cieľ experimentálnej časti .....                       | 27 |
| 4.3 | Charakteristika pracovného stroja .....                | 27 |
| 4.4 | Charakteristika BK .....                               | 28 |
| 4.5 | Charakteristika procesnej kvapaliny .....              | 30 |
| 4.6 | Charakteristika obrobku.....                           | 30 |
| 4.7 | Proces realizácie experimentálnej časti .....          | 31 |
| 5   | Vyhodnotenie Experimentálnej časti .....               | 35 |
|     | ZÁVER .....  | 37 |
|     | Zoznam Použitých zdrojov .....                         | 38 |
|     | Zoznam použitých symbolov a skratiek .....             | 40 |

## ÚVOD

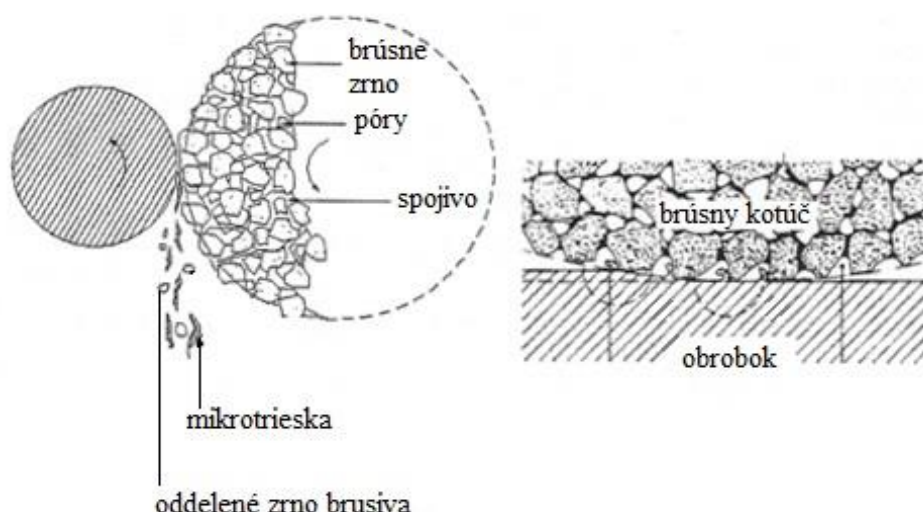
Ako v každom napredujúcom odvetví, tak aj v strojárstve sa s vývojom nových technológií začnú vyskytovať problémy, ktoré majú rôznorodé príčiny vzniku. Technológia brúsenia prešla obrovským vývojom počas celej histórie ľudstva, no ešte stále sa vyvíja, a tým pádom sa v tejto sfére stále vyskytujú nedostatky, najmä v sériovej výrobe, ktoré treba odstrániť. V ložiskovom priemysle je presnosť a kvalita povrchu na prvom mieste, pretože ich následné použitie býva vo väčšine prípadoch v súčiastiach, ktoré túto presnosť vyžadujú. Nedostatky, ako sú popáleniny na povrchu obrobku, možno plynú z čoraz prísnejších časových požiadaviek zo strany zákazníka, a tým pádom nedostačujúceho výskumu v tejto oblasti. Preto je bakalárska práca zameraná na túto tému.

Vznik tepelne ovplyvnenej vrstvy zapríčiňujú nevhodné podmienky pri procese brúsenia. Za nevhodné podmienky možno stanoviť nevhodný nástroj (materiál, tvar) voči materiálu obrobku, nevhodne použitá procesná kvapalina alebo vôbec nepoužitá, nevyhovujúce rezné podmienky (rezná rýchlosť, posuvná rýchlosť). Popálenina na povrchovej vrstve ložiskového krúžku síce nie je vada, ktorá by spôsobila nefunkčnosť ložiska, ale dokáže ovplyvniť životnosť ložiska a v niektorých prípadoch výrazne. Bakalárska práca sa bude snažiť objasniť ako takáto vada na obrobku vzniká, s čím všetkým súvisí a v neposlednej rade pôjde o elimináciu tohto nežiadúceho javu.

# 1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE BRÚSENIA

## 1.1 Proces technológie brúsenia

Brúsenie je dokončovací proces obrábania, pri ktorom dochádza k malému odberu materiálu (malé triesky) pomocou vhodného brúsiaceho nástroja. Brúsiacich nástrojov je veľké množstvo a líšia sa tvarom, štruktúrou, materiálom a použitím. Brúsiaci kotúč (BK) je tvorený viacerými malými časticami z tvrdého materiálu (spekané karbidy, diamant), ktoré sú spojené do jedného celku pomocou spojiva (napr. syntetická živica). Súčasťou BK sú aj póry, ktoré slúžia k odvádzaniu triesok. Cieľom brúsenia je dosiahnutie presných rozmerov, tvarov a požadovaných hodnôt drsnosti povrchu dosahujúcich až  $0,2 \mu\text{m}$ . Pri výrobkoch s veľmi vysokou požadovanou presnosťou drsnosti povrchu sa po brúsení realizujú ešte tzv. super-dokončovacie metódy, ako je napríklad honovanie alebo lapovanie, ktoré dokážu dosiahnuť ešte kvalitnejší povrch. Ďalšou výhodou brúsenia je schopnosť obrábať týmto spôsobom takmer všetky typy kovových a nekovových materiálov bez ohľadu na ich tvrdosť. Preto sa brúsenie využíva aj ako hlavný proces obrábania kalených ocelí. Brúsenie môže taktiež slúžiť k obnove rezacích vlastností súčiastok určených k rezaniu. Tento proces sa nazýva ostrenie. [1,2,3]



Obr.1 Štruktúrne znázornenie brúsenia. [4]

### 1.1.1 História brúsenia

Brúsenie človek využíva už od pradávna. Zbrane a nástroje vyrobené prevažne z materiálov ako bronz či železo sa brúsili pomocou pieskovcových hornín, ktoré mali abrazívne vlastnosti. Z toho vyplýva, že spočiatku bolo brúsenie využívané najmä pre proces ostrenia nástrojov. Postupom času sa ale brúsenie začalo využívať aj ako proces obrábania a to hlavne vďaka tomu, že sa brúsiace stroje a nástroje zdokonaľovali a cez brúsiace kamene, papiere a pasty, pilníky a ručné brúsky, sa brúsky dostali až k automatizovaným centrážom, ktoré sú súčasťou takmer všetkých dnešných spoločností vo výrobnom priemysle. S brúsením sa stretávame v najväčšej miere v automobilovom priemysle a s ním spojenými odvetvami. Treba si však uvedomiť, že brúsiaci nástroj sa nachádza v každej domácnosti po celom svete. Aj keď je v súčasnosti brúsenie považované

za samozrejmosť a rutinu, vhodný výber nástroja a jeho materiálu a rezných podmienok je stále výzva, ktorú sa nie vždy podarí úspešne zvládnuť. [5]

### 1.1.2 Kinematika brúsenia

Táto časť sa bude venovať BK, pretože je najpoužívanější a taktiež preto, lebo sa pomocou neho bude vykonávať experimentálna časť. Hlavným pohybom pri brúsení je rotačný pohyb (RP) a vykonáva ho BK. Rýchlosť, ktorou rotuje BK, sa nazýva rezná rýchlosť. Tá závisí od viacerých parametrov. Vzťah pre výpočet reznej rýchlosti  $v_c$  je

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{60\,000} \quad (1)$$

Stretnúť sa môžeme taktiež s rovnicou pre obvodovú rýchlosť  $v_s$ . Tá je definovaná vzťahom

$$v_s = \frac{\pi * d * n}{60\,000} \quad (2)$$

Vedľajší pohyb môže byť buď translačný (TP) alebo rotačný a vykonáva ho obrobok. Pri RP je obrobok upevnený vo vreteníku alebo na otáčavom stole. Pre obvodovú rýchlosť obrobku pri RP  $v_o$  platí vzťah

$$v_o = \frac{\pi * d_o * n_o}{1000} \quad (3)$$

TP obrobku je realizovaný pomocou posuvných pracovných stolov. Podľa smeru otáčania brúsiaceho kotúča môžeme zaviesť 3 druhy translačného posuvu obrobku:

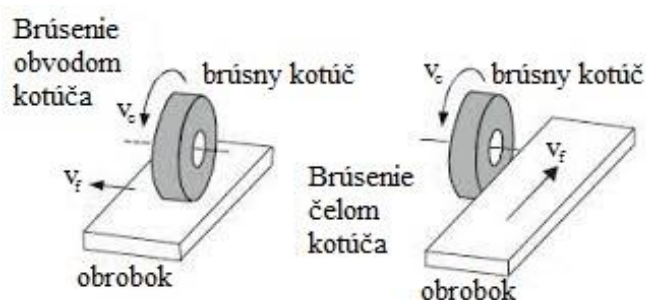
- axiálny pohyb
- radiálny pohyb
- tangenciálny pohyb

Pre tieto typy TP sú zavedené veličiny potrebné k výpočtu rýchlosti posuvu. [1, 5]

Pre axiálny pohyb:  $v_{fa} = f_a * n_o$  (4)

Pre radiálny pohyb:  $v_{fr} = f_r * n_o$  (5)

Pre tangenciálny pohyb:  $v_{ft} = f_t * n_o$  (6)



Obr. 2 Kinematická schéma brúsenia. [6]

## 1.2 Typy brúsiek

Brúsky možno rozdeliť na viacero druhov podľa viacerých kritérií (podľa tvaru obrobku, rezných podmienok, nástroja atď.). [5,7]

Základné rozdelenie:

- a) stojanová brúska
- b) hrotová brúska
- c) bezhrotová brúska
- d) rovinná brúska
- e) otvorová brúska

Do vlastnej kategórie spadajú špeciálne brúsky, ktoré sa využívajú najmä na obrábanie tvarovo náročnejších obrobkov (ozubené kolesá, kľukové hriadele alebo závit) a nástrojové brúsky, ktoré sa tiež nazývajú ostričky, využívané na ostrenie nástrojov (vrtáky, sústružnícke nože, frézy). [5,7]

### 1.2.1 Stojanová brúska

Používa sa na ručné brúsenie, na kusovú výrobu, preto je možné sa s ňou stretnúť v domácnostiach aj na pracoviskách rôzneho zamerania. Stojanová brúska pozostáva z elektromotoru a jeho hriadele, na ktorej koncoch sú upevnené dva BK. Spravidla býva jeden kotúč určený na väčšie odbery materiálu s nižšou kvalitou povrchu po brúsení a druhý kotúč, ktorý má jemnejšiu štruktúru a slúži na dokončovacie operácie na obrobkoch, kde je potrebná vyššia kvalita povrchu. Výhodou tejto brúsky je schopnosť ostrenia nástrojov. [5,7]

### 1.2.2 Hrotová brúska

Hrotová brúska slúži na obrábanie valcových a kužeľových plôch. Oproti stojanovej brúske je jej konštrukcia zložitejšia. Skladá sa z lôžka, na ktorom je upevnený pracovný stôl. Na pracovnom stole sa nachádza pracovný vretenník (PV) slúžiaci na upínanie obrobku a koník, ktorý slúži na podopretie obrobku. Pracovný stôl sa môže pomocou špeciálnych koľajníc pozdĺžne posúvať po lôžku. Ďalšou časťou hrotovej brúsky je brúsiaci vretenník (BV), v ktorom je upnutý BK. BV vykonáva priečny pohyb, takže pohyb do alebo zo záberu. Obidva vretenníky sa môžu pri novších typoch hrotových

brúsiiek natáčať, čo je výhoda napríklad pri brúsení čelných plôch obrobku, pretože namiesto brúsenia čelom kotúča je možné brúsiť obodom kotúča, čím dosiahneme menšie tepelné zaťaženie obrobku. Niektoré typy hrotových brúsiiek majú viacero BV s kolmým aj šikmým prísunom kotúča, vďaka čomu je možné obrábať aj zložitejšie súčiastky, ako sú ozubené kolesá, ventily alebo kľukové hriadele. Do hrotových brúsiiek sa zaraďujú aj zápichové brúsky, ktoré nemajú posuvný pracovný stôl ani koníka na dôkladnejšie upnutie obrobku. [5,7]

### 1.2.3 Bezhrtová brúška

Bezhrtové brúsky sa využívajú na brúsenie vonkajších rotačných (valcových, kužeľových) plôch, ale dokáže obrobiť aj vnútorné rotačné plochy. Do BV bezhrtovej brúsky na vonkajšie rotačné plochy (centrelesy) sa upína BK. Obrobok nie je pevno upnutý, ale je uložený na podpernej lište, známej tiež ako podperné pravítko. Obrobok je však otáčaný pomocou podávacieho kotúču, ktorý je upnutý v podávacom vretenníku. Pri priebežnom brúsení je podávací kotúč naklonený tak, aby dával obrobku aj axiálny smer posuvu. Podávací kotúč môže byť so závitom (priebežné brúsenie) alebo hladký, ktorý je podobný brúsiacemu kotúču. Bezhrtové brúsky na vnútorné plochy majú okrem BV a podávacieho vretenníku aj voľne otočné podperné kladky, na ktorých je obrobok uložený. Bezhrtové brúsky sú veľmi výkonné a preto sú určené najmä pre sériovú výrobu. [5,7]



Obr. 3 CNC brúška. [8]

#### 1.2.4 Rovinná brúska

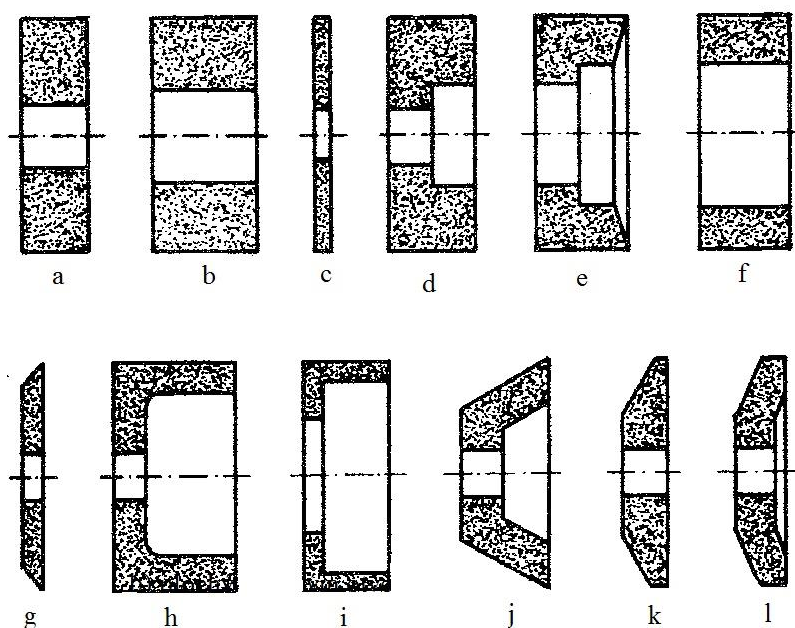
Rovinné brúsky sú využívané na obrábanie rovinných plôch a rôznych rovinných útvarov. Rovinné brúsky sa rozdeľujú na zvislé (vertikálne) a vodorovné (horizontálne). Rozdelenie je na základe smerovania vretena, do ktorého sa upína BK. Pri zvislej rovinnej brúske sa využíva k brúseniu čelo kotúča, pri vodorovnej rovinnej brúske sa zasa k brúseniu využíva obvod kotúča. Obrobok je upnutý na pracovnom stole, ktorý je väčšinou elektromagnetický. Pracovný stôl koná voči BK vratný pozdĺžny (tangenciálny) pohyb, ale v oboch jeho úvrtiach môže konať axiálny pohyb. Radiálny pohyb obrobku zabezpečuje BV. Horizontálna rovinná brúska môže byť vybavená ešte otáčavým pracovným stolom, v niektorých prípadoch je možné stretnúť sa s týmto otáčavým stolom aj pri vertikálnych rovinných brúskach. Rovinné brúsky sa využívajú ako v kusovej, tak aj v sériovej výrobe. [5,7]

#### 1.2.5 Otvorová brúska

Otvorová brúska slúži na obrábanie otvorov valcových a kužeľových súčastí. BV môže byť priečne nastaviteľný a koná vratný pozdĺžny pohyb, ktorý možno doplniť o výdrž v úvrtiach. Obrobok sa upína do univerzálneho skľučovadla, ktoré je uložené na PV. PV sa môže natáčať v určitom rozmedzí (záleží od typu brúsky). Vďaka tomu je možné obrábať aj kužeľové plochy. U novších typov otvorových brúsiek je možné stretnúť sa s dvomi BV, pomocou ktorých je možné obrábať nie len otvory, ale aj čelné alebo vonkajšie plochy obrobku. [5,7]

#### 1.3 Druhy BK podľa tvaru

BK môžu mať veľké množstvo tvarov, závisí na ich použití. Môžu sa vyrábať špeciálne BK využívané v kusovej výrobe, ale aj BK typické pre sériovú výrobu. BK využívané na brúsenie vonkajších častí obrobku majú iný tvar a iné upínanie ako kotúče využívané na obrábanie vnútorných častí obrobku. Tvar BK závisí tiež na pracovnej časti kotúča (brúsenie obvodom, čelom). [5]



a) plochý, b) plochý s veľkým otvorom, c) rezací, d) s jednostranným vybraním, e) so skoseným vybraním, f) prstencový, g) jednostranne skosený, h) hrncový, i) hrncový s veľkým otvorom, j) miskový, k) kužeľový, l) tanierový

Obr. 4 Tvary BK. [5]

## 1.4 Materiály BK

### 1.4.1 Materiály brusív

Materiály, ktoré sa využívajú ako brusivo v BK, sú väčšinou minerálneho pôvodu. Tieto materiály sú veľmi tvrdé a zachovávajú si rezacie vlastnosti aj po odlomení časti zrna. Medzi najznámejšie a najpoužívanéjšie brusivá patria: [9, 10, 11]

- Korund, oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – vyrába sa z bauxitovej rudy, ktorá sa pred spracovaním najskôr kalcinuje pri  $950^\circ\text{C}$ , a tým sa odstráni nežiaduca voda. Do bauxitu sa primieša malé množstvo zemného koksu a železných triesok (2-3 %), v indukčných peciach sa táto zmes roztaví približne pri  $2000^\circ\text{C}$ . Pri vyprázdňovaní pece sa odstráni vrstva nečistôt a na záver sa odoberú jadrá oxidu hlinitého, ktoré sa spracujú na abrazívne zrná. V súčasnosti sa využíva viacero druhov korundov (hnedý, biely, ružový, červený). Zrná korundu sa spekajú, vďaka čomu sa vylamujú menšie časti zrna a dosahuje sa lepší proces samoostrenia. Využíva sa najmä pri brúsení tvrdých a vysoko pevnostných materiálov (legované ocele, nástrojové ocele). [9, 10, 11]
- Karbid kremíka – zmes kremičitého piesku ( $\approx 60\%$ ) a jemne mletého ropného koksu ( $\approx 40\%$ ). Pre zvýšenie pórovitosti sa pridáva malé množstvo pilín. Pre podporu reakcie uhlíku s kremíkom a taktiež pre odstránenie nečistôt sa pridáva do zmesi soľ ( $\text{NaCl}$ ). Zmes je v peci zohriata na  $2200^\circ\text{C}$ , pričom veľká časť tejto zmesi začne kryštalizovať, a tým vytvárať abrazívne



zrno. Využitie hlavne pri brúsení materiálov s nízkou pevnosťou v ťahu (liatina, hliník, meď, nekovové materiály). [9, 10, 11]

- c) Kubický nitrid bóru (KBN) – pozostáva z atómov bóru a dusíka. Syntéza KBN prebieha z hexagonálneho nitridu bóru v kryštalickej forme. Ako katalyzátor syntézy sa používa kovové lítium, ktoré sa pridáva do hexagonálneho nitridu bóru pri vysokom tlaku (takmer 7 000 MPa) a pri teplote 1650 °C. [9, 10, 11]
- d) Syntetický diamant – vzniká z grafitu pri veľmi vysokom tlaku v rozmedzí od 5 500 MPa do 13 000 MPa a za prítomnosti kovového katalyzátoru pri teplote od 1400 °C do 2500 °C. [9, 10, 11]

#### 1.4.2 Materiály spojív

Spojivo nemá žiadny brúsiaci efekt, preto je jeho úlohou dať BK stabilitu a držať abrazívne zrno v BK, pokiaľ sa zrno neotupí. Vtedy má spojivo zabezpečiť uvoľnenie zrna, tak, aby začalo brúsiť nové, ostré zrno. Obsah spojiva určuje tvrdosť a schopnosť rezania BK. Pre rezacie procesy sa najčastejšie používa spojivo vyrobené z gumy alebo živice. Najvyužívanejšie materiály sú: [10, 12]

- a) Syntetická živica (bakelitové spojivo) – spojivo zo syntetickej živice sa väčšinou vyrába na základe fenolovej živice. Tento typ spojiva sa rozdeľuje na plnené a neplnené. Plnivá v značnej miere ovplyvňujú vlastnosti spojiva. BK spájané s týmto druhom spojiva sa vytvrdzujú pri teplote cca 180 °C. Sú menej citlivé na teplotné šoky, nárazy a údery než BK spájané keramickým spojivom. Vďaka elasticite tohto typu spojiva je vhodné pre jemné brúsenie, brúsenie za sucha a v niektorých prípadoch aj pre hrubovacie brúsenie. Je však nutné pozorné použitie procesnej kvapaliny, aby hodnota pH nebola pod 9, lebo by mohlo prísť k porušeniu spojiva. [10,12]
- b) Keramické spojivo – skladá sa z kaolínu, kremeňa, živcu a sklenenej taveniny. Miešaním týchto komponentov sa získajú požadované vlastnosti spojiva. BK sa vyrábajú vypaľovaním pri teplote približne 900 °C, ale môžu sa vypaľovať až do 1400 °C. Sú odolné voči chemickým vplyvom a je možné ich skladovať po neobmedzenú dobu. Sú však citlivé na náraz a tepelné šoky. Opatrebovanie spojiva nastáva pôsobením brúsiacich síl. [10, 12]

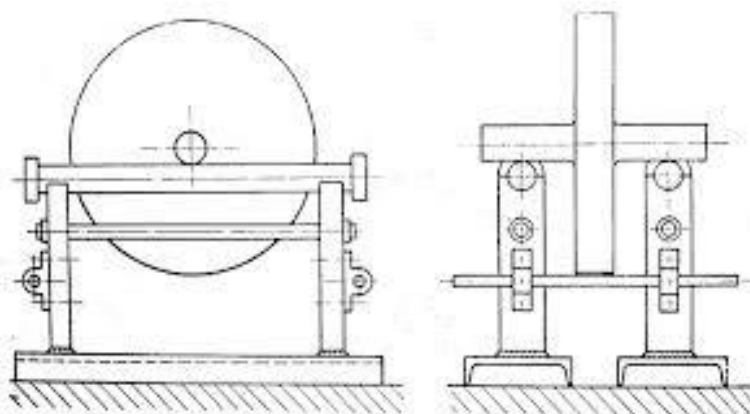
#### 1.5 Vyvažovanie BK

Po upnutí BK a spustení stroja môže kotúč začať hádzať. Hádzanie je nežiaduci jav, ktorý je spôsobený zlým rozmiestnením (vyvážením) hmoty kotúča. Kotúč, ktorý začne hádzať, môže spôsobiť viacero negatívnych javov, napr.: zhoršuje kvalitu povrchu na obrobku, zvyšuje namáhanie ložísk vretena a taktiež môže prísť k úplnému zničeniu kotúča. Hádzanie je možné eliminovať vyvážením BK. Vyvažovanie sa delí na dva typy: [7, 10]

- a) Statické vyvažovanie – BK sa nasadí spolu s prírubami na vyvažovací trň, ktorý je na oboch koncoch posadený na vyvažovacích valčekoch

(koľajničky). Vyvažovacie valčeky musia byť vo vodorovnej polohe, aby sa po nich kotúč samovoľne nepohyboval. Následne sa kotúč roztočí, časť ktorá má vyššiu hmotnosť ako ostatné zostane vždy dolu a na opačnú stranu kotúča sa umiestni vyvažovacie teliesko. Tento postup sa opakuje, pokým kotúč nezastane v hocijakej polohe a neprevrháva sa po dotočení. Po vyvážení nasleduje zrovnanie kotúča a opätovné vyváženie. [7, 10]

- b) Dynamické vyvažovanie – princíp tohto druhu vyvažovania je v tom, že na príruby BK je namontované zariadenie, ktoré pozostáva z drážky v tvare špirály a vyvažovacieho telieska. Po spustení stroja a zariadenia na vyvažovanie sa teliesko začína presúvať v drážke, v závislosti od polohy nevyváženosti, čím mení polohu ťažiska kotúča. K tomuto zariadeniu sa dá pripojiť aj snímač chvenia, ktorého meranie vynáša do počítača krivku chvenia. Tento typ vyvažovania je oveľa rýchlejší, ale finančne náročnejší. [7, 10]



Obr. 5 Statické vyvažovanie. [13]

### 1.6 Zrovnávanie BK

Zrovnávanie je proces, pri ktorom sa vylamujú, prerezávajú alebo inak tvarujú brúsne zrná. Zrovnávanie výrazne ovplyvňuje kvalitu povrchu obrobku po brúsení a jeho účelom je obnoviť rezacie vlastnosti BK, jeho tvarovanie a odstránenie nečistôt z povrchu kotúča. Zrovnávacie nástroje môžu byť diamantové alebo bezdiamantové. Bezdiamantové sú väčšinou tvorené zo spekaných karbidov a slúžia k hrubému zrovnaniu, ktoré nedosahuje vysokú presnosť. Diamantové zrovnávače sa delia na rotujúce a pevne stojace (jednokamenné a viackamenné). Dosahujú vysokú presnosť zrovnanej plochy a sú efektívnejšie ako zrovnávače zo spekaných karbidov. Je však nutné nevystavovať ich nárazom a teplotným šokom. [7,10]

### 1.7 Označovanie BK

Označenie BK popisuje jeho vlastnosti pomocou niekoľkých písmen a čísiel. Tieto čísla popisujú použiteľnosť BK z hľadiska veľkosti a materiálu zrna, typu spojiva, pórovitosti atď. Existujú normy na označovanie BK, ale každý výrobca má vlastný typ značenia. Označenie BK môže vyzeráť nasledovne:

1 300x50x76 A36L5V35

- 1 – udáva tvar (typ) BK,
- 300x50x76 – udáva vonkajší priemer BK, šírku BK a priemer upínacej diery v mm, v tomto poradí,
- A – materiál brúsiacich zŕn,
- 36 – zrnitosť (veľkosť brúsiacich zŕn),
- L – tvrdosť BK,
- 5 – pórovitosť,
- V – materiál spojiva,
- 35 – maximálna obvodová rýchlosť v  $\text{m.s}^{-1}$ . [14]

## 2 CHARAKTERISTIKA PROCESNÝCH KVAPALÍN

### 2.1 Charakteristika procesných kvapalín

Procesná kvapalina je látka rôzneho skupenstva, ktorá má viacero funkcií. Základné funkcie sú chladiace, mazacie a čistiace. Dostatočné chladenie výrazne znižuje množstvo nežiaduceho tepla a taktiež znižuje namáhanie a opotrebenie nástroja. Táto skutočnosť poskytuje vyššiu efektivitu výroby, pretože je možné meniť rezné podmienky. Mazacia schopnosť procesnej kvapaliny znižuje trenie medzi nástrojom a obrobkom, čím dochádza k zníženiu energetickej náročnosti procesu brúsenia. Čistiaca funkcia zabezpečuje plynulý odber triesky z miesta rezu. Niektoré typy procesných kvapalín majú aj konzervačnú schopnosť. [2, 15, 16]

Dôležitou požiadavkou na procesné kvapaliny je aj zdravotná neškodnosť a chemická stálosť. Z toho vyplýva, že kvapalina nemôže agresívne reagovať s ľudským telom a kovovými a nekovovými časťami stroja. Do kvapalín sa, naopak, pridávajú prímеси, ktoré zabezpečujú ochranné a konzervujúce vlastnosti zabezpečujúce ochranu stroja pred koróziou a inými nežiaducimi javmi. Pri strojoch používajúcich procesné kvapaliny je nutné mať zabezpečené dostačujúce vetranie a čistiace prípravky, pretože obsluha stroja častokrát dochádza do kontaktu s touto kvapalinou. [2, 15, 16]

### 2.2 Základné rozdelenie procesných kvapalín

Procesné kvapaliny sa rozdeľujú podľa viacerých kritérií. Z hľadiska ekológie sa delia na prírodné a syntetické. Z hľadiska zloženia sa rozdeľujú na vodou miešateľné kvapaliny a vodou nemiešateľné kvapaliny. Vodou nemiešateľné kvapaliny majú v porovnaní s vodou miešateľnými veľa pozitív. Najväčším pozitívom je absencia vody, ktorá reaguje s povrchom kovov a tým spúšťa korózný proces, taktiež sa vo vode môže nachádzať množstvo baktérií. Ďalšou výhodou je nižšie povrchové napätie u rezných olejov v porovnaní s vodou. Naopak najväčším negatívom je nízky chladiaci účinok. To je spôsobené schopnosťou vody vyparovať prebytočné teplo. Hromadenie tepla v olejoch môže viesť až k ich vzplanutiu, a preto sa používajú najmä pri dokončovacích operáciách, kde sú požiadavky na vysokú akosť povrchu (honovanie, lapovanie). [2, 15, 16]

Medzi vodou miešateľné kvapaliny patria:

1. Vodné roztoky – sú vždy alkalické. Nepoužívajú sa veľmi často ako procesné kvapaliny. Používajú sa väčšinou na odvod tepla z pracovného prostredia. [2, 16]
2. Emulzné kvapaliny – zmes dvoch kvapalín, ktoré sa samovoľne nezmiešajú a rôznych prímесových látok (emulgátory). Emulzia (olej vo vode) je v súčasnosti vďaka kombinácii vlastností rezných olejov a vody jednou z najvyužívanejších procesných kvapalín. Pri výrobe emulzie je však dôležité dodržanie určitých postupov a hodnôt pH (8-9). [2, 16]
3. Syntetické a polysyntetické kvapaliny – neobsahujú minerálne oleje, ktoré sú nahradené rozpúšťadlami (polyglykoly a estery). Sú veľmi dobre rozpustné vo vode a využívajú sa najmä pri brúsení z viacerých dôvodov. Za najväčšiu výhodu možno považovať možnosť sledovania procesu brúsenia, čo je umožnené obsahom glykolu, ktorý je priehľadný. Ďalším

pozitivom je, že táto procesná kvapalina nie je závislá na kvalite vody, avšak obsah vody so sebou nesie aj negatívum a to v podobe odparovania sa. Voda musí byť do procesnej kvapaliny pridávaná a je koncentrácia stále kontrolovaná, pretože jej zníženie vedie k zvýšeniu hodnoty pH a to môže viesť k zdravotným problémom obsluhy stroja. [2, 15, 16]

Do vodou nemiešateľných kvapalín patria:

1. Minerálne oleje – bezfarebné oleje zložené z cyklických parafínov a alkénov. Majú dobrú mazacu schopnosť, chránia obrobok i nástroj pred koróziou a sú cenovo dostupné. Majú však nízky chladiaci účinok. [15]
2. Syntetické oleje – tak ako syntetické kvapaliny, aj syntetické oleje sú založené na polyglykoloch. Vznikajú syntézou a sú prírodne nezávadné. Majú vysokú životnosť a oproti minerálnym olejom majú aj vysoké hodnoty vznietenia, čo ich predurčuje pre širšie použitie. [15, 16]
3. Koncentráty vysokotlakových prísad – zušľachtené minerálne oleje alebo aditivované rezné oleje. Aditíva zlepšujú mazacie vlastnosti a tlakovú únosnosť a väčšinou sú to prvky ako síra, chlór, fosfor; najlepšia je ich kombinácia. Tieto prvky tvoria na povrchu nástroja aj obrobku povrchovú vrstvu, ktorá znižuje trenie medzi nimi. Ako prísady sa dajú použiť aj pevné mazivá, ktoré ale nie sú veľmi používané z dôvodu ich náročnej prípravy. Ako pevné mazivo sa používa grafit a sírnik molybdénu. [2, 15, 16]

### 2.3 Voľba procesnej kvapaliny

Voľba procesnej kvapaliny sa odvíja od mnohých faktorov, od samotného typu technológie obrábania až po finančnú stránku. Procesná kvapalina ovplyvňuje viacero aspektov, ako napr.: životnosť nástroja, kvalita obrobenej súčiastky alebo plynulosť výroby. Preto sa kladie vysoký dôraz na správnu voľbu procesnej kvapaliny a samotnú kombináciu jej potrebných účinkov a vlastností.

Najdôležitejšou vlastnosťou procesnej kvapaliny je chladiaci účinok. Každá kvapalina je schopná odvádzať teplo, ale množstvom odvedeného tepla sa líšia. Procesná kvapalina odvádza teplo z miesta rezu, teda z nástroja a obrobku v podobe výparného tepla alebo radiáciou do okolia a nádrže, kde je späťne privádzaná. Kvalita chladenia závisí od viacerých faktorov a tými sú veľkosť povrchového napätia (zmáčavosť) a penenie. Z dôvodu vyšších požiadaviek na produkciu sa zvyšujú aj rezné rýchlosti a veľkosť odberu materiálu, čím sa produkuje viac nežiaduceho tepla, a tým sú požiadavky na chladiaci účinok procesnej kvapaliny omnoho vyššie. [2, 15, 16, 17]

Ďalšou vlastnosťou, ktorou by mala procesná kvapalina oplývať je mazací účinok. Mazacia schopnosť znižuje trenie medzi povrchmi nástroja a obrobku, taktiež medzi povrchmi nástroja a triesky. Z dôvodu vyššieho tlaku pri obrábaní sa mazanie realizuje pomocou tzv. medzného trenia, ktoré ale počíta s dostatočnou afinitou kvapaliny voči kovu alebo pomocou chemickej väzby. Čím užšia mazacia vrstva je dosiahnutá, tým väčší klesajú energetické požiadavky stroja, rezné sily a taktiež sa zlepšuje kvalita povrchu obrobku. Na úkor dobrých mazacích vlastností procesnej kvapaliny sa však z dôvodu menšieho odvodu tepla znižujú chladiace účinky. [2, 15, 16, 17]

Procesná kvapalina má za úlohu taktiež odstraňovať nečistoty a triesky z miesta rezu. Triesky zvyšujú prebytočné teplo v mieste rezu a nečistoty zase zanášajú brúsiaci kotúč, preto je potrebné obe tieto zložky odstrániť z miesta rezu. Procesná kvapalina by tak isto mala byť schopná umožniť týmto nečistotám usádzanie na dne nádrže a tým zabrániť ich opätovnému výskytu v obehú kvapaliny. [2, 15, 16, 17]

Pri brúsení a obrábaní celkovo sa procesná kvapalina nedostáva do styku iba s nástrojom a obrobkom, ale aj s ostatnými časťami stroja, ktoré sú z rôznych materiálov (kovy, gumeny, plasty, nátery). Preto je potrebné, aby procesná kvapalina chemicky nereagovala s týmito časťami stroja a nevytvárala na ich povrchu nežiaduce javy, akým je napríklad korózia. Naopak procesná kvapalina by mala mať ochranné účinky a tieto časti konzervovať a tým chrániť pred nežiaducimi okolitými vplyvmi. [2, 15, 16, 17]

Nemenej dôležité je zloženie procesnej kvapaliny z hľadiska zdravotnej neškodnosti. Obsluha stroja prichádza do styku s procesnou kvapalinou rovnako ako stroj a preto sa musí dbať na zloženie procesnej kvapaliny aj z tohto hľadiska. Nesprávne zloženie by mohlo viesť ku kožným chorobám alebo inhaláciou k dýchacím problémom. [2, 15, 16, 17]

Najmä v sériovej výrobe, kde je denne používaných stovky litrov procesnej kvapaliny, sa rieši finančná stránka. Voľba procesnej kvapaliny, ktorá má správnu kombináciu tu uvedených vlastností, vysokú životnosť a je cenovo dostupná býva neľahká. Procesná kvapalina však ovplyvňuje proces obrábania viac, než sa môže zdať.

### 3 PRÍČINY VZNIKU TEPELNE OVPLYVNENEJ POVRCHOVEJ VRSTVY

#### 3.1 Príčiny vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy

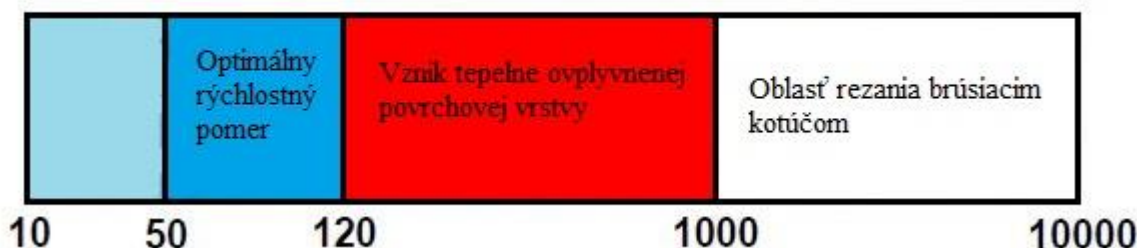
Tepelne ovplyvnená povrchová vrstva vzniká, keď teplota obrobku v brúsnej zóne stúpa nad teplotu temperovania materiálu v dôsledku nevhodných podmienok brúsenia, čo vedie k popúšťaniu a mikroštruktúrnym zmenám v povrchovej a podpovrchovej vrstve obrobku, ktoré môžu sprevádzať zníženie pevnosti, plasticity, tvrdosti a môže spôsobiť nepriaznivé zvyškové napätie. Pred spustením procesu brúsenia určitého obrobku je nutné dôkladne rozobrať technologické parametre obrobku a podľa toho správne nastaviť rezné podmienky a samotný nástroj. Pri nedodržaní tejto analýzy dochádza k viacerým nežiaducim javom, medzi ktoré patria popáleniny na povrchovej vrstve, ktorá má niekoľko štádií. Počiatočné štádium iba jemne zafarbí povrch obrobku, ale pokročilé štádiá už vytvárajú mikroskopické deformácie, ktoré ovplyvňujú životnosť komponentu. Medzi najčastejšie príčiny vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy patria: nevhodne zvolené rezné podmienky, absencia procesnej kvapaliny (tzv. brúsenie nasucho) a nesprávne chladenie, nesprávne zvolený brúsiaci kotúč. [3, 17, 18]

##### 3.1.1 Nevhodné rezné podmienky vedúce k vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstve

Voľba rezných podmienok závisí od viacerých faktorov a pri nesprávnom určení jedného z nich prichádza k nežiaducim javom na povrchu obrobku. Zmenou rôznych parametrov brúsenia sa dá docieľiť lepšia kvalita povrchu bez tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy, napr. znížením reznej rýchlosti nástroja a prísuvovej rýchlosti obrobku, zvýšením posuvovej rýchlosti obrobku, zmenšením kontaktnej plochy medzi nástrojom a obrobkom. Z hľadiska voľby reznej rýchlosti nástroja a posuvnej rýchlosti obrobku sa zavádza veličina nazvaná rýchlostný pomer. Rýchlostný pomer je pomer reznej (obvodovej) rýchlosti kotúča [ $\text{m.s}^{-1}$ ] a rýchlosti obrobku [ $\text{mm.min}^{-1}$ ] a je definovaný ako:

$$q_s = \frac{v_c}{v_w} \quad (7) [17]$$

Pri hrubovacom brúsení je optimálny rýchlostný pomer rovný 50. Pri štandardnom brúsení sa musí rýchlostný pomer nachádzať v intervale (60;80), v ideálnom prípade je to rovno 72. Jemné brúsenie vyžaduje rýchlostný pomer v intervale (90;120). Prekročením hodnoty rýchlostného pomeru 120 sa začínajú objavovať prvé popáleniny na povrchu obrobku a vzniká tepelne ovplyvnená povrchová vrstva. [17]

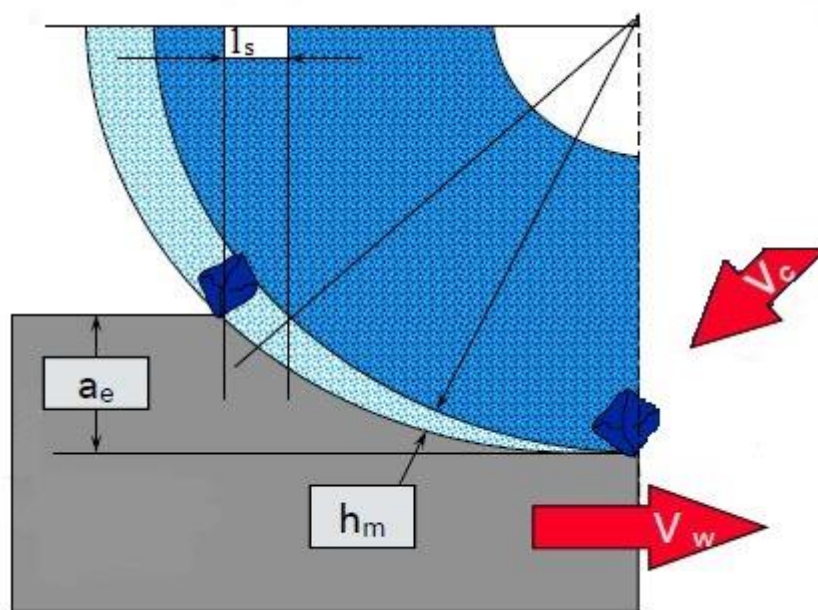


Obr. 6 Intervaly hodnôt rýchlostných pomerov. [17]

Kontaktná plocha medzi nástrojom a obrobkom sa dá zredukovať pomocou šikmého nastavenia brúsiaceho kotúča a to zmenšením plochy záberu čela kotúča. Kontaktnú plochu pri vnútornom brúsení možno zredukovať aj vhodnou veľkosťou priemeru brúsiaceho kotúča vzhľadom k priemeru obrobku. Vonkajší priemer kotúča by mal dosahovať 2/3 až 4/5 veľkosti vnútorného priemeru obrobku. [17]

Dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje kvalitu povrchu pri brúsení je aj teoretická hrúbka triesky. Teoretická hrúbka triesky je pomer hĺbky prísuvu a rýchlostného pomeru:

$$h_m = \frac{a_e}{q_s} \quad (8) [17]$$



Obr. 7 Teoretická hrúbka triesky. [17]

Ďalším faktorom ovplyvňujúci kvalitu povrchu je odobraný časový objem triesok. Definovaný je vzťahom:

$$Q_w = \frac{v_f \cdot d_w \cdot \pi}{60} \quad (9)$$

$$Q_w = \frac{a_e \cdot n_w \cdot d_w \cdot \pi}{60} \quad (10) [17]$$

Ideálna hodnota pre vyhovujúcu kvalitu povrchu a dostatočnú rýchlosť výroby je  $Q_w = 5 \text{ mm}^3/\text{mm}/\text{s}$ . [17]

### 3.1.2 Nevhodnosť procesnej kvapaliny vedúca k vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy

Prítomnosť procesnej kvapaliny pri brúsení výrazne znižuje riziko vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy. Pri absencii procesnej kvapaliny alebo nevyhovujúcom prevedení chladenia sa však toto riziko zvyšuje mnohonásobne. Po správnej voľbe procesnej kvapaliny nastávajú ďalšie problémy, ktoré môžu zapríčiniť popáleniny na povrchu obrobku. Procesná kvapalina sa najčastejšie dostáva do miesta rezu pomocou potrubia, ktoré má na konci dýzu určitého tvaru a prietoku. Umiestnenie a tvar dýzy, ako aj

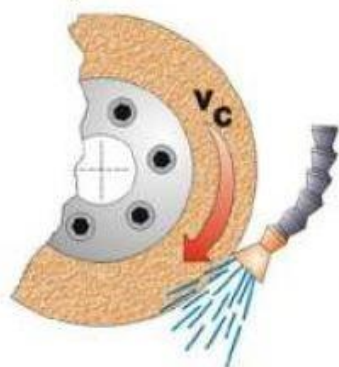


jej prietok a výtoková rýchlosť majú podiel na vzniku a eliminácii popálenín na povrchu obrobku. [17]

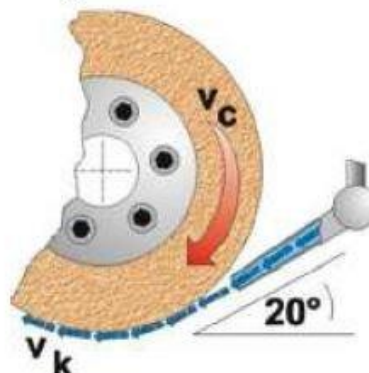
Umiestnenie by malo byť vždy ešte pred miestom rezu a lúč procesnej kvapaliny by mal vystupovať z dýzy pod uhlom približne  $20^\circ$  s jednou z os kotúča. Pri dodržaní tohto uhla sa procesná kvapalina „nalepí“ na obvod kotúča a tým sa v najväčšom množstve dopraví na miesto rezu. Výsledná výtoková rýchlosť kvapaliny by mala byť rovnaká ako obvodová rýchlosť kotúča pre dosiahnutie najdôkladnejšieho chladiaceho účinku. Dýza by taktiež mala byť schopná usmerniť procesnú kvapalinu do lúča, pretože s väčším rozptýlením kvapaliny dochádza ku zníženiu efektivity chladenia. Prietok procesnej kvapaliny závisí od typu brúsenia a materiálu obrobku. Procesnú kvapalinu sa odporúča privádzať na brúsiaci kotúč aj počas zrovnávania kotúča. [17]

V dnešnej dobe sa však stále viac realizuje brúsenie nasucho a to hneď z niekoľkých dôvodov. Z hľadiska zdravotnej a environmentálnej bezpečnosti je používanie procesných kvapalín stále rizikom. Ďalším faktorom nepoužívania procesných kvapalín je aj výrazné zníženie nákladov výroby. Na druhej strane nesie tento typ brúsenia so sebou niekoľko negatív, ktoré je treba odstrániť (nižšia produktivita výroby, menšia životnosť nástroja). [17]

Nesprávne chladenie



Správne chladenie

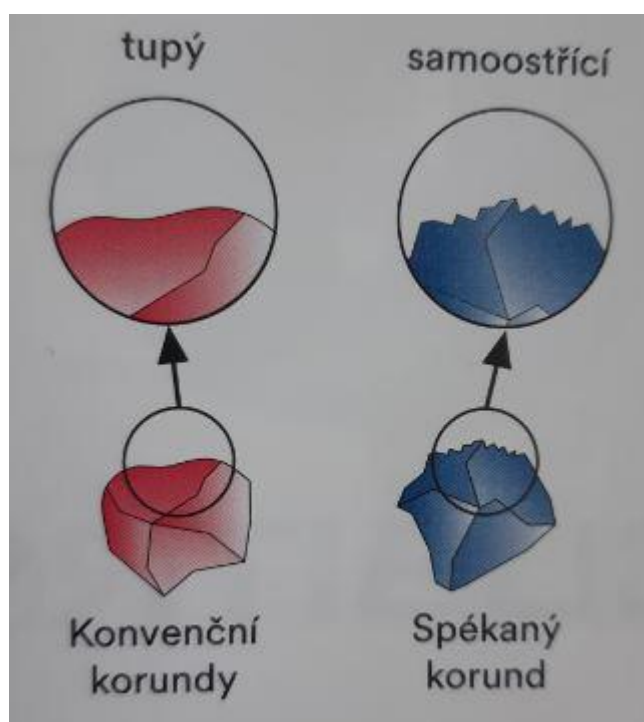


Obr. 8 Nastavenie chladenia. [17]

### 3.1.3 Vznik tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy z dôvodu nevhodného brúsiaceho nástroja

Brúsiaci kotúč dokáže do veľkej miery ovplyvniť výslednú kvalitu obrobku. Jedným z dôvodov vzniku popálenín na povrchu obrobku je brúsenie čelom kotúča. Najdôležitejšia z hľadiska kvality povrchu obrobku je štruktúra brúsiaceho kotúča. Pokiaľ má brúsiaci kotúč vysokú porozitu, trieska sa ľahšie odvedie mimo miesto rezu a tým sa zníži tepelné namáhanie obrobku. Brúsne zrna tvoriace štruktúru brúsiaceho kotúča sa postupne otupuje, a tak musí mať schopnosť samoostrenia. Je to proces odlamovania kúskov zrna a tým opätovné nadobúdanie ostrej hrany. Ak sa brúsne zrna neodlamujú a hrany v zábere zostávajú otupené, riziko vzniku popálenín na povrchu obrobku sa zväčšuje. Na kvalite povrchu obrobku sa však podieľa aj spojivo brúsiaceho kotúča a jeho správny výber. [17]

Brúsenie a samotnú kvalitu povrchu obrobku po brúsení ovplyvňujú aj vonkajšie činitele, napr. nedostatočné zrovnávanie brúsiaceho kotúča, kmitanie vyvolané strojom, nevhodným upnutím brúsiaceho kotúča alebo nevyvážením kotúča. [17]

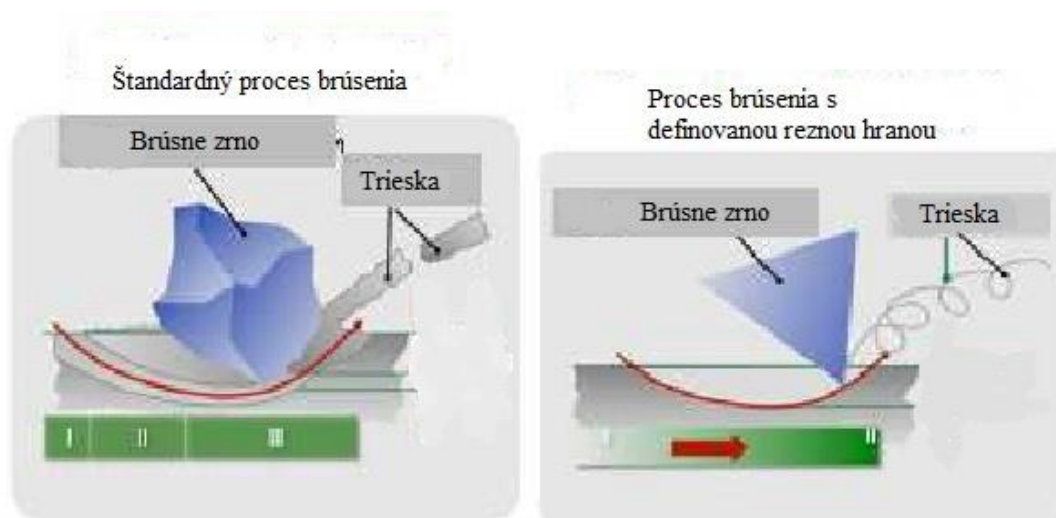


Obr. 9 Porovnanie vlastností korundov [10]

### 3.2 Eliminácia tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy

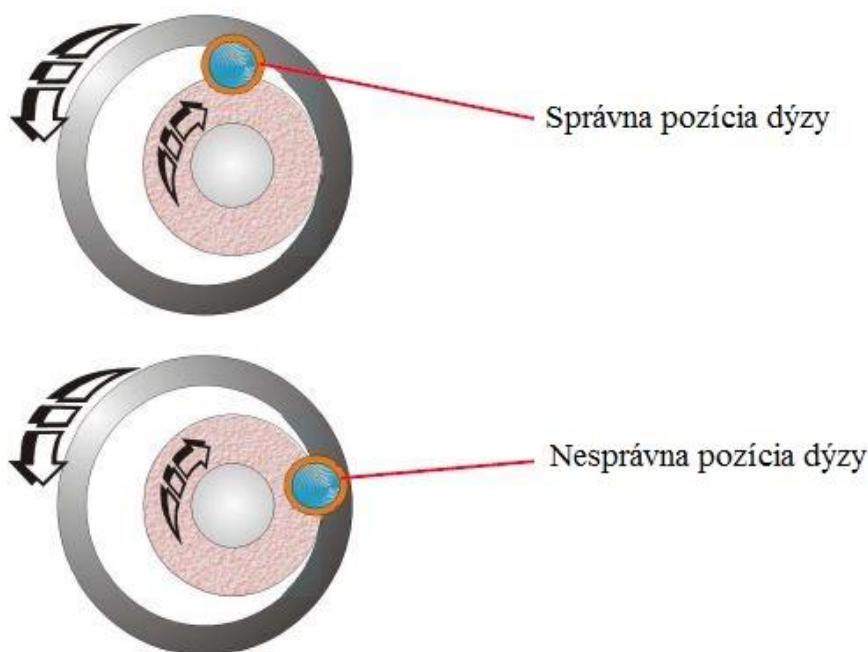
Tepelne ovplyvnená povrchová vrstva je nežiaduci jav, ktorý je odstrániteľný viacerými spôsobmi. Eliminácia povrchovej vrstvy je realizovateľná pomocou optimalizácie niekoľkých faktorov. Medzi tieto faktory patria:

1. **Obrobok** – jednou z možností ako dosiahnuť kvalitnejší povrch obrobku bez tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy je aj zmena v parametroch samotného obrobku. Zvýšením obvodovej rýchlosti pri brúsení naguľato a zvýšením posuvovej rýchlosti pri plošnom brúsení (znížením rýchlostného pomeru pod hodnotu 120) sa dá eliminovať vznik tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy. Taktiež pomocou zmenšenia kontaktnej plochy medzi obrobkom a brúsiacim kotúčom sa znižuje riziko vzniku tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy. [17]
2. **Brúsiaci kotúč** – zmenou parametrov brúsiaceho kotúča sa účinne eliminuje vznik TOPV. Možností je viacero: zredukovaním reznej (obvodovej) rýchlosti kotúča, zredukovaním prísuvovej rýchlosti, voľba mäkkšieho kotúča, použitie kotúča s obsahom väčších brúsiacich zŕn, kotúč s väčšou pórovitosťou, upnutie kotúča bez vzniku kmitania, dostatočne časté zrovnávanie kotúča. Eliminácia TOPV sa však dá dosiahnuť aj tvarovaním brúsneho zrna do požadovaných tvarov a rozmerov. Definovaná rezná hrana zrna spôsobuje oveľa menšie tepelné zaťaženie obrobku, vďaka tvarovo definovanej triesky. Tvarovanie zŕn je namáhavý proces z časového aj finančného hľadiska, avšak energetické nároky na stroj a nároky na procesnú kvapalinu sa výrazne znižujú. [17]



Obr. 10 Porovnanie tvarovaného a netvarovaného brúsneho zrna. [17]

3. **Procesná kvapalina** – procesná kvapalina pri správnej voľbe eliminuje TOPV a zlepšuje kvalitu povrchu obrobku. Opatrenia pre skvalitnenie povrchu sú: správna koncentrácia látok obsiahnutých v procesnej kvapaline, filtrácia a priebežné obohacovanie aditívami procesnej kvapaliny, správne nastavenie trysky (tvar, prietok, rýchlosť prúdenia, umiestnenie), prídanie dodatočnej trysky na čistenie brúsiaceho kotúča, včasná výmena procesnej kvapaliny. [17]



Obr. 11 Nastavenie dýzy chladiaceho systému. [17]

4. **Brúsiaci stroj** – brúsiaci stroj musí byť odizolovaný od ostatných strojov, aby sa zabránilo vynútenému kmitaniu a miesto rezu musí byť dostatočne kryté od nečistôt z okolia. [17]

## 4 EXPERIMENTÁLNÁ ČASŤ

### 4.1 Schaeffler, spol. s r.o.

Spoločnosť Schaeffler vznikla v roku 1946 v Nemecku, kde ju založili bratia Wilhelm a Georg Schaefflerovci a v súčasnosti zamestnáva viac ako 90 000 ľudí v 170 prevádzkach v 50 krajinách po celom svete. Spoločnosť Schaeffler sa radí medzi svetovú špičku v oblasti výroby ložísk a komponentov pre automotive a industry odvetvia. Do spoločnosti Schaeffler patria menšie spoločnosti ako napríklad INA, LuK, FAG, Barden a Hydrel. Stratégiou spoločnosti Schaeffler je tzv. mobilita pre zajtrajšok, ktorej myšlienkou je ekologickjší a bezpečnejší svet. Pozostáva zo 4 hlavných častí: ekologické pohony (elektromobily, priemyselné pohony), mestská mobilita (vnútromestské železnice, dvojkoľosové vozidlá, mikromobily), medzimestská mobilita (lietadlá, koľajnicové vozidlá), energetický reťazec (veterná a solárna energia, konvenčná výroba elektrickej energie). Podnik v Skalici, kde je vykonaná experimentálna časť, bol založený v roku 1991 a zamestnáva približne 5000 ľudí. Výroba v tomto podniku je zameraná na ihlové ložiská (radiálne aj axiálne), komponenty do ložísk (klietky), synchronizačné krúžky a rôzne lisované súčiastky. V podniku sa využívajú rôzne výrobné technológie, napr.: trieskové obrábanie s definovanou aj nedefinovanou reznou hranou, tvárnenie, zvarovanie, tepelné spracovanie a úprava povrchov. [19]

### 4.2 Cieľ experimentálnej časti

Cieľom experimentálnej časti je skúmanie vzniku TOPV a jej následné zníženie vzniku alebo úplná eliminácia. Experimentálna časť je venovaná vzniku TOPV z dôvodu zvýšeného trenia medzi BK a obrobkom a jej eliminácia pomocou zmeny brúsiacich parametrov. Výsledky experimentu budú následne preskúmané a v prípade ekonomickej návratnosti aj použité vo výrobe. Experiment je z väčšej časti zameraný na jeden z obrobkov, ktorý je problémový z hľadiska vzniku TOPV.

### 4.3 Charakteristika pracovného stroja

Experimentálna časť bude vykonaná na čelnej brúske Saturn od firmy Junker.

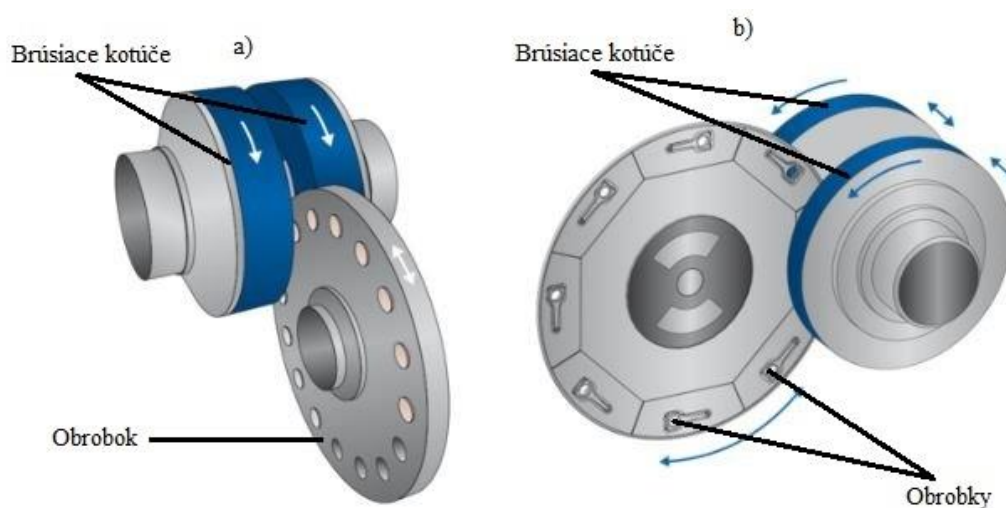
Brúska Saturn obrába vo dvoch rovinách (obe čelá obrobku) pomocou dvoch vertikálnych BK. Pri priebežnom brúsení sú BK k sebe navzájom zľahka naklonené, takže obrobok vedený naprieč brúsnou zónou dosahuje svoj finálny rozmer až na výstupe z tejto zóny. [20]

Pri zapichovacom spôsobe brúsenia sú BK umiestnené rovnobežne voči sebe. Nosič obrobku sa naďalej otáča s nízkymi otáčkami. Oba BK sa súčasne prisúvajú, až pokiaľ nie je dosiahnutý konečný rozmer obrobku. [20]

Výhody tejto brúsky spočívajú v automatickom nakladaní a vykladaní obrobkov do stroja, jednoduchá výmena BK, automatické rozpoznanie typu obrobku a menšia konštrukcia samotného stroja. [20]



Obr. 12 Brúška Saturn [20]



Obr. 13 Typy brúsenia na brúske Saturn [20]: a) priebežné brúsenie, b) zapichovacie brúsenie

#### 4.4 Charakteristika BK

Použitými BK pri realizácii experimentálnej časti je BK od spoločnosti Atlantic NK 1 90E 08 RE HA-FA a BK od spoločnosti 3M Cubitron 2.

- a) Atlantic – brúsne zrnó je tvorené z 95-96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (oxid hlinitý) a má veľkosť 160  $\mu\text{m}$ . BK je veľmi mäkký (nutnosť mäkšieho BK z dôvodu brúsenia kalených ložiskových krúžkov) a má vyššiu pórovitosť, spojivo je tvorené zo syntetickej živice. [21]





Obr. 14 Brúsiaci kotúč Atlantic

- b) 3M Cubitron 2 – BK Cubitron 2 má špeciálne tvarované zrno (tvar trojuholníka) s definovanou reznou hranou (viď. obr. 10). Abrazívne zrno je zo spekaného korundu a použité je sklokeramické spojivo. [10]



Obr. 15 Brúsiaci kotúč 3M Cubitron 2

Ako zrovnávací nástroj je použitý jednohrotý, diamantový zrovnávač z dvojkarátového diamantu (viď. obr. 16).



Obr. 16 Diamantový zrovnávač jednohrotý [22]

#### 4.5 Charakteristika procesnej kvapaliny

Počas realizácie experimentálnej časti bola použitá emulzia HOSMAC S127. Táto emulzia je miešateľná s vodou a obsahuje minerálny olej. Je určená pre mäkké obrábanie a hodnota pH je 9,3. Jej výhodou je vysoká teplota vzplanutia a odolnosť proti výbuchu.

#### 4.6 Charakteristika obrobku

Obrobkami sú ložiskové krúžky dvoch rôznych tvarov a materiálov. Obrobok 1 je vnútorný ložiskový krúžok tvorený z ložiskovej ocele 100Cr6 a tvaru vid'. obr. 17a. Obrobok 2 je vonkajší ložiskový krúžok tvorený z antikorovej ocele X90CrMoV18 a tvaru vid'. obr. 17b. Obrobok 1 tvorí približne 95% produkcie ložiskových krúžkov v podniku Schaeffler Skalica.

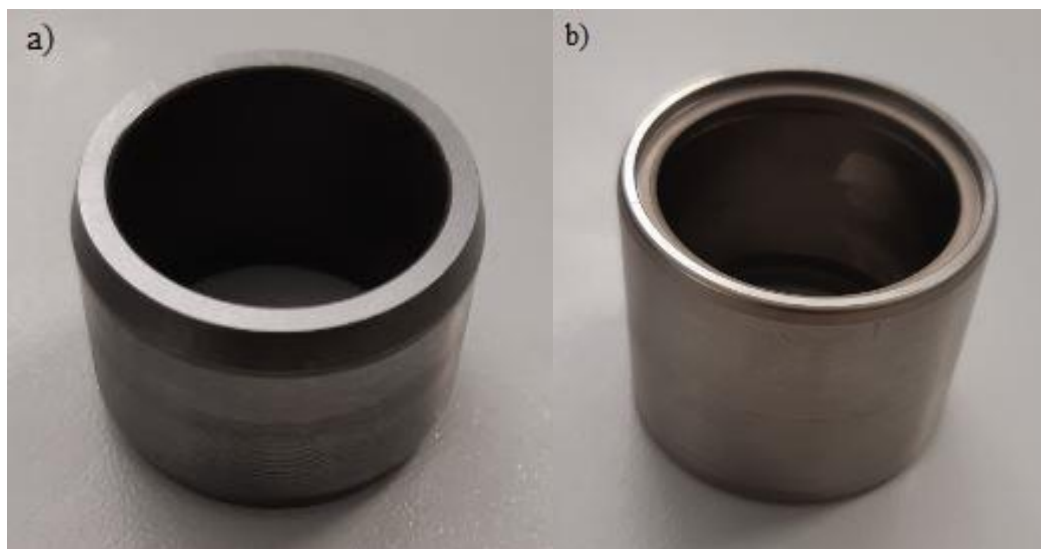
Tab. 4.6a Mechanické vlastnosti a chemické zloženie oceli 100Cr6

| Chemické zloženie [hm. %]         |                  |             |              |                       |                               |   |                   |          |
|-----------------------------------|------------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------------------------|---|-------------------|----------|
| C                                 | Mn               | Si          | Cr           | Ni                    | Cu                            | Ni+Cu   | P                 | S        |
| 0,9-1,1                           | 0,3-0,5          | 0,15-0,35   | 1,3-1,65     | max 0,3               | max 0,25                      | max 0,5   | max 0,027         | max 0,03 |
| Mechanické a fyzikálne vlastnosti |                  |             |              |                       |                               |   |                   |          |
| Medza pevnosti [MPa]              | Medza klzu [MPa] | Ťažnosť [%] | Tvrdosť [HB] | Modul pružnosti [GPa] | Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ] | Merná tepelná kapacita [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] | Rezistivita [Ω.m] |          |
| 608-765                           | 441              | 18          | max 225      | 202-213               | 7850                          | 480   | 256,1             |          |

Tab. 4.6b Mechanické vlastnosti a chemické zloženie oceli X90CrMoV18

| Chemické zloženie [hm. %]         |                  |             |              |                 |                               |
|-----------------------------------|------------------|-------------|--------------|-----------------|-------------------------------|
| C                                 | Cr               | Mo          | V            | Mn              | Si                            |
| 0,9-1,05                          | 16-18            | 0,9-1,3     | 0,07-0,12    | max 0,9         | max 0,7                       |
| Mechanické a fyzikálne vlastnosti |                  |             |              |                 |                               |
| Medza pevnosti                    | Medza klzu [MPa] | Ťažnosť [%] | Tvrdosť [HB] | Modul pružnosti | Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ] |

|       |     |    |         |       |      |
|-------|-----|----|---------|-------|------|
| [MPa] |     |    |         | [GPa] |      |
| 800   | 550 | 20 | max 265 | 200   | 7700 |



Obr. 17 Ložiskové krúžky: a) vnútorný (obrobok 1), b) vonkajší (obrobok 2).

#### 4.7 Proces realizácie experimentálnej časti

Experimentálna časť je rozdelená na dve hlavné časti. V prvej časti sa obrába obrobok 1 a v druhej časti obrobok 2.

1. Obrábanie vnútorného ložiskového krúžku z ložiskovej ocele 100Cr6. Pre tento typ obrobku je špecializovaný BK NK 1 90E 08 od spoločnosti Atlantic. Z tohto dôvodu je experiment zrealizovaný len s použitím tohto typu BK. Pri brúsení tohto obrobku boli použité parametre vid'. tab. 1.

Tab. 1 Brúsiace parametre 1:

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| Rezná rýchlosť:                 | 20 [m/s]     |
| Posuvová rýchlosť:              | 2 [m/min]    |
| Rýchlosť zrovnávania:           | 700 [mm/min] |
| Odber materiálu pri zrovnávaní: | 0,03 [mm]    |
| Počet zdvihov zrovnávača:       | 4            |

Na prvom obrobenom ložiskovom krúžku bola nameraná hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Po obrobení 5000 ks obrobkov bola nameraná hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,18 \mu\text{m}$ .

2. Obrábanie vonkajšieho ložiskového krúžku z antikorovej ocele X90CrMoV18.
  - a) Pri prvom brúsení s BK NK 1 90E 08 od spoločnosti Atlantic boli použité parametre vid'. tab. 2.

Tab. 2 Brúsiace parametre 2:

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| Rezná rýchlosť:    | 20 [m/s]  |
| Posuvová rýchlosť: | 2 [m/min] |



|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| Rýchlosť zrovnávania:           | 700 [mm/min] |
| Odber materiálu pri zrovnávaní: | 0,03 [mm]    |
| Počet zdvihov zrovnávača:       | 4            |

Na prvom obrobenom ložiskovom krúžku bola nameraná hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,33 \mu\text{m}$ . Po obrobení 500 ks obrobkov bola nameraná hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,15 \mu\text{m}$ .

- b) Pri druhom brúsení s BK NK 1 90E 08 od spoločnosti Atlantic boli použité parametre vid'. tab. 3.

Tab. 3 Brúsiace parametre 3:

|                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| Rezná rýchlosť:                 | 20 [m/s]      |
| Posuvová rýchlosť:              | 2 [m/min]     |
| Rýchlosť zrovnávania:           | 1000 [mm/min] |
| Odber materiálu pri zrovnávaní: | 0,03 [mm]     |
| Počet zdvihov zrovnávača:       | 4             |

Po zrovnaní BK vyššou rýchlosťou bola nameraná hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,521 \mu\text{m}$ . Po obrobení 700 ks obrobkov bola nameraná hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,13 \mu\text{m}$ . Pri tejto hodnote drsnosti povrchu je opäť zvýšené riziko vzniku TOPV, avšak je dosiahnutá vyššia produktivita.

- c) Pri tretom brúsení s BK NK 1 90E 08 od spoločnosti Atlantic boli použité parametre vid'. tab. 4.

Tab. 4 Brúsiace parametre 4:

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| Rezná rýchlosť:                 | 20 [m/s]     |
| Posuvová rýchlosť:              | 2 [m/min]    |
| Rýchlosť zrovnávania:           | 700 [mm/min] |
| Odber materiálu pri zrovnávaní: | 0,04 [mm]    |
| Počet zdvihov zrovnávača:       | 4            |

Po zvýšení odberu materiálu zrovnaním sa dosiahla hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ . Po obrobení 550 ks bola nameraná hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,16 \mu\text{m}$ .

- d) Pri štvrtom brúsení s BK NK 1 90E 08 od spoločnosti Atlantic boli použité parametre vid'. tab. 5:

Tab. 5 Brúsiace parametre 5:

|                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| Rezná rýchlosť:                 | 20 [m/s]      |
| Posuvová rýchlosť:              | 2 [m/min]     |
| Rýchlosť zrovnávania:           | 1000 [mm/min] |
| Odber materiálu pri zrovnávaní: | 0,04 [mm]     |

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Počet zdvihov zrovnávača: | 4 |
|---------------------------|---|

Po zvýšení rychlosti zrovnávání a odberu materiálu pri zrovnávaní sa dosiahla hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,85 \mu\text{m}$ . Táto drsnosť povrchu však už nespĺňa požadované hodnoty, ktoré sú predpísané na výrobnom výkrese súčiastky.

- e) Obrábanie vonkajšieho ložiskového krúžku z antikorovej ocele X90CrMoV18 BK Cubitron II od spoločnosti 3M. Pri brúsení boli použité parametre vid'. tab. 6.

Tab. 6 Brúsiace parametre 6:

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| Rezná rýchlosť:                 | 20 [m/s]     |
| Posuvová rýchlosť:              | 2 [m/min]    |
| Rýchlosť zrovnávania:           | 700 [mm/min] |
| Odber materiálu pri zrovnávaní: | 0,03 [mm]    |
| Počet zdvihov zrovnávača:       | 4            |

Na prvom obrobenom ložiskovom krúžku bola nameraná hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,335 \mu\text{m}$ . Po obrobení 2000 ks obrobkov bola nameraná hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 0,13 \mu\text{m}$ .

|                |       |    |  |
|----------------|-------|----|--|
| Perthometer M1 |       |    |  |
| Object         |       |    |  |
| Name           |       |    |  |
| #              |       |    |  |
| Lt             | 1.750 | mm |  |
| Ls Standard    | 2.5   | μm |  |
| Lc             | 0.250 | mm |  |
| Ra             | 0.335 | μm |  |
| Rz             | 2.34  | μm |  |

|                |       |    |  |
|----------------|-------|----|--|
| Perthometer M1 |       |    |  |
| Object         |       |    |  |
| Name           |       |    |  |
| #              |       |    |  |
| Lt             | 1.750 | mm |  |
| Ls Standard    | 2.5   | μm |  |
| Lc             | 0.250 | mm |  |
| Ra             | 0.130 | μm |  |
| Rz             | 1.03  | μm |  |

Obr. 15 Příklad z nameraných hodnot drsností povrchu po brúsení obrobkov.

## 5 VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI

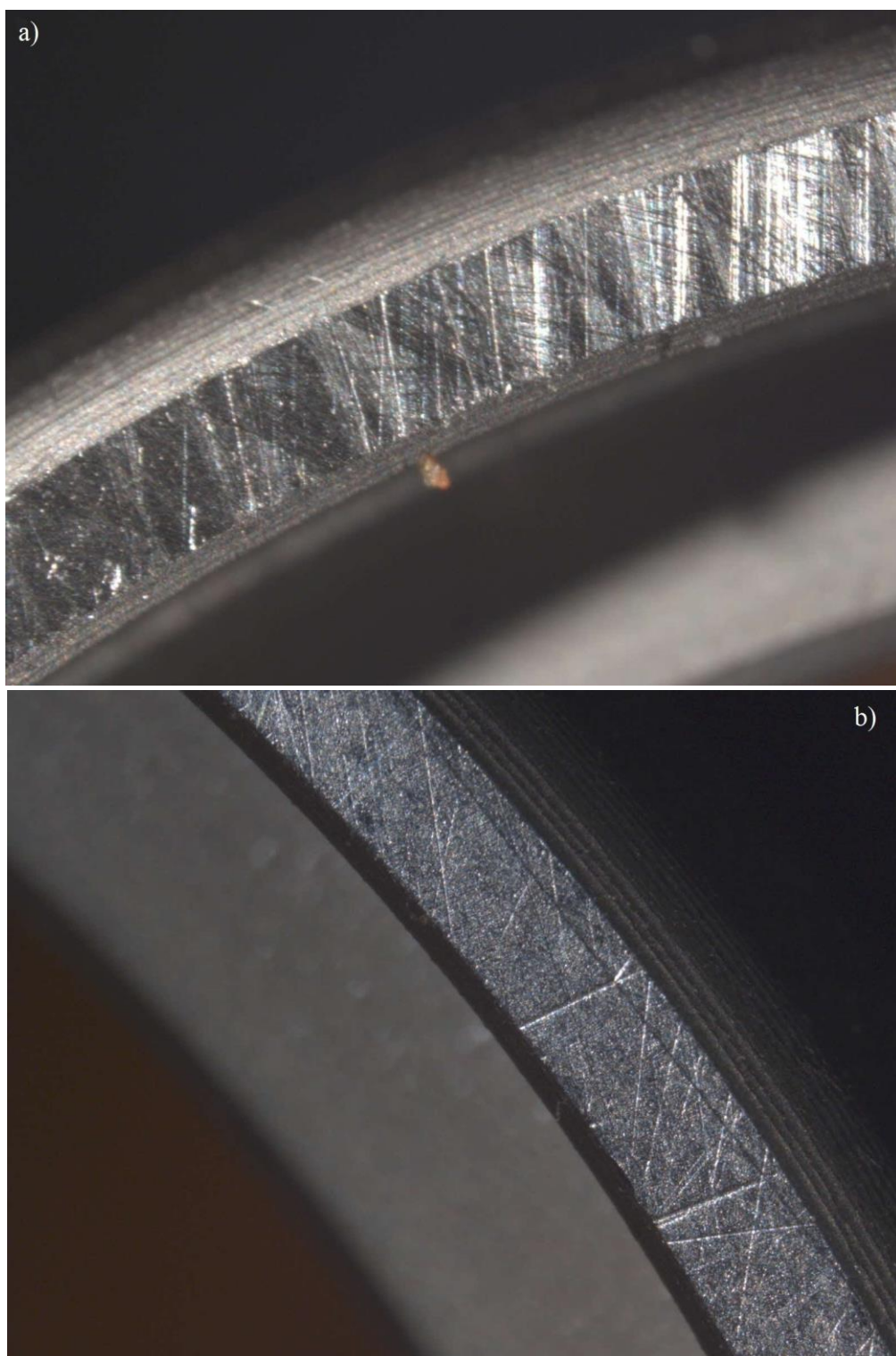
Experimentálna časť bola zameraná v najväčšej miere na obrobok z antikorovej ocele X90CrMoV18, pretože pri tomto type materiálu je zvýšené riziko vzniku TOPV z dôvodu zvýšeného trenia medzi BK a obrobkom. Výskum bol zameraný na zlepšenie kvality povrchu obrobku a produktivity s použitím BK NK 1 90E 08 od spoločnosti Atlantic. Pri tomto type BK vznikala TOPV najčastejšie. Hlavným dôvodom jej vzniku bolo trenie, ktoré bolo spôsobené klesajúcimi až úplne strácajúcimi sa abrazívnymi vlastnosťami brúsiacich zrn. Dôsledok straty týchto vlastností brúsiaceho zrna je viditeľný na obrázku č. 16. Snímky z mikroskopu dokazujú, aký je rozdiel medzi plochou, ktorá bola obrobená zrnami s abrazívnymi vlastnosťami a plochou, ktorá bola obrobená zrnami s minimálnymi abrazívnymi vlastnosťami. Toto znižovanie abrazívnych vlastností brúsiaceho zrna je viditeľné z nameraných hodnôt drsností povrchu v časti 4.7. Tento jav je spôsobený vlastnosťami materiálu obrobku, ktorý „zalepí“ brúsiace zrná a vzniká nadmerné teplo medzi plochami obrobku a BK, ktoré je následne absorbované do obrobku a dochádza k vzniku TOPV. Eliminácia TOPV na obrobku je uskutočniteľná viacerými možnosťami.

Jednou z možností bolo zníženie intervalu medzi zrovnávaniami BK, no v tomto prípade dochádza k zníženiu výrobnéj produktivity.

Ďalšou možnosťou bolo zmena brúsiacich parametrov. Tento experiment bol zameraný na zmenu zrovnávacích parametrov. Najskôr bola navýšená rýchlosť zrovnávania, ktorá dosahovala vyššiu produktivitu ako brúsenie s nižšou rýchlosťou zrovnávania. Následne bol zvýšený odber materiálu pri zrovnávaní BK, ktorý nebol z hľadiska produktivity tak efektívny ako zvýšenie zrovnávacej rýchlosti. Ako záverečná zmena bola zvýšená rýchlosť zrovnávania BK aj odber materiálu pri zrovnávaní BK. V tomto prípade však bola prekročená predpísaná hodnota drsnosti povrchu, ktorá bola stanovená na hodnotu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ , a preto sa v tejto časti experimentu nepokračovalo.

Následovala výmena BK. Použitý bol BK Cubitron II od spoločnosti 3M. Tento BK dosiahol, pri rovnakých brúsiacich parametroch, aké boli použité pri prvom brúsení s BK od Atlanticu, vynikajúcu produktivitu pri zachovaní kvalitného povrchu na obrobku.

Na obrázku č.16 je viditeľný rozdiel medzi hodnotami drsností povrchu obrobku, ktoré boli namerané v rámci experimentálnej časti. Na obrázku 16a je vidno stopy (ryhy) po abrazívnych zrnách, ktoré dosahujú požadovanú hodnotu drsnosti povrchu a nevzniká riziko výskytu TOPV. Naopak na obrázku 16b je vidno takmer hladká plocha, ktorá síce má jemnejšiu štruktúru povrchu ako plocha na obrázku 16a, ale tu figuruje veľmi vysoké riziko vzniku popálenín z dôvodu trenia BK a obrobku (brúsiace zrnó je „obalené“ trieskou z obrobku a je nutné ďalšie zrovnanie BK). Tu sa naplno prejavuje výhoda BK so špeciálne tvarovaným brúsiacim zrnom, pretože toto zrnó vytvára symetrickú triesku, ktorá je okamžite odvádzaná mimo oblasť rezu pomocou procesnej kvapaliny.



Obr. 16 Snímky z mikroskopu: a) plocha obrobku obrobená po zrovnání BK, b) plocha obrobku obrobená před zrovnáním BK.

## ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bola analýza a následná eliminácia tepelne ovplyvnenej povrchovej vrstvy po brúsení ložiskových krúžkov, ktorá pri tomto procese obrábania vzniká. V experimentálnej časti boli použité dva typy materiálov ložiskových krúžkov s odlišnými vlastnosťami. Tieto ložiskové krúžky z oboch materiálov boli obrobené pomocou brúsiaceho kotúča od spoločnosti Atlantic.

Pri obrobní 1 z klasickej ložiskovej ocele boli pri použití tohto BK dosiahnuté výborné výsledky z hľadiska kvality obrobenia, produktivity a prevádzkových nákladov.

Pri brúsení obrobní 2 z antikorovej ocele tým istým BK však boli dosiahnuté oveľa menej uspokojivé výsledky, ktoré sú viditeľné v experimentálnej časti. Tieto nedostatky boli čiastočne eliminované pomocou zmeny zrovnávacích parametrov. Týmto zmenami prišlo k zlepšeniu kvality povrchu obrobní po brúsení a zvýšení produktivity, avšak prišlo k zníženiu životnosti BK a diamantového zrovnávača.

Preto bol vymenený BK a ďalším testovaným BK bol Cubitron II od spoločnosti 3M, ktorý má špeciálne tvarované zrno – preto sa hovorí o brúsení s definovanou reznou hranou. Tento BK tvaruje triesky do dlhých „vlákien“ a tým odvádza teplo z miesta rezu ďaleko lepšie ako BK od Atlanticu. S využitím tohto typu BK prišlo k rapidnému zvýšeniu produktivity a životnosti BK a zrovnávača, pri zachovaní kvality povrchu obrobní.

Ďalším veľkým rozdielom medzi týmito BK je aj cena. Kým cena BK od Atlanticu je okolo 300 €, tak cena BK od 3M je okolo 600 €. Preto je pri rozhodovaní vo voľbe BK rozhodujúci najmä počet obrobní, ktoré budú obrobené. BK od 3M je vhodný hlavne pre sériovú výrobu z dôvodu obstarávacích nákladov.

Z experimentálnej časti je taktiež viditeľné, že na kvalitu povrchu obrobní vplýva typ zrovnávača, jeho stav v priebehu procesu obrábania a v neposlednej rade interval medzi zrovnávaniami BK. Zrovnávanie BK síce znižuje výrobu a životnosť kotúča, ale taktiež zlepšuje kvalitu povrchu obrobní.

Na kvalitu povrchu obrobní pri procese brúsenia vplýva mnoho faktorov, a preto je treba správna voľba všetkých parametrov, ktoré daný proces ovplyvňujú. Od nástroja až po okolie samotného stroja musí odpovedať náležitým požiadavkám, ktoré majú byť dosiahnuté. TOPV je nežiaduci jav, a preto je treba tento jav eliminovať. Eliminácia sa dá dosiahnuť viacerými možnosťami. Jednou z nich je výmena BK a následné správne nastavenie parametrov počas samotného procesu brúsenia. BK však musí byť správne vyvážený a upnutý, inak hrozí poškodenie obrobní a samotného stroja.

**ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV**

1. PÍŠKA, M. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255s. ISBN 80-214-2374-9.
3. Baofeng, H.; Cui'e, W.; Siyuan, D.; Zhaoyao, S.: A survey of methods for detecting metallic grinding burn. *Measurement*, ročník 134, 2019, s. 426 – 439, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.093>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118310364>
4. Štruktúrne znázornenie brúsenia. *Mechanické predúpravy povrchu* [online]. URL: <https://povrchove-upravy3.webnode.sk/news/mechanicke-predupravy-povrchu/>
5. KOVAČIČ, Ľ. Klasifikácia spôsobov brúsenia. [Bakalárska práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Ústav výrobných technológií. Školiteľ: prof. Ing. Zdenko Lipa, CSc. Trnava: MtF STU, 2010. 47 s.
6. KNIEBÜGL, L.: Strojárska technológia [online]. SPU Nitra, 2008. URL: [http://www.mechossi.inr.sk/pomocky/subory/Strojarska\\_technologia.pdf](http://www.mechossi.inr.sk/pomocky/subory/Strojarska_technologia.pdf).
7. BARTOŇOVÁ, R. Technologie broušení [online]. VOŠ, SOŠ Kopřivnice, 2012. URL: [http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U01\\_Technologie\\_brouseni.pdf](http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U01_Technologie_brouseni.pdf).
8. CNC Brúska. URL: <http://www.taima.cz/hrotove-brusky/cnc-brusky/>.
9. SWAGATA, B.; RUDRA, N. Selection of abrasive materials for manufacturing grinding wheels. *MaterialsToday: Proceedings*, ročník 5, 2018, s. 2860 – 2864, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.077>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318300877>.
10. 3M Precizní broušení: Konvenční brusné kotouče (katalóg). 08/2015, PGF-070-CZ.
11. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
12. JIANG, S.; FENG, H.; JUNLIN, X.; XIAOQING, L.; HU, Y. Effect of heat treatments on the Li<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaO glass-ceramic bond and the glass-ceramic bond cBN grinding tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, ročník 78, 2019, s. 201 – 209, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.09.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436818305158>.
13. ŠLOSŘ, M. Řešení technologie jednodrážkové řemenice s operací statické vyvážení: Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 40 s., 6 příloh. Ing. Milan Kalivoda.
14. SEDLÁK, J. Dokončovací metody obrábění, vybrané nekonvenční metody obrábění (prednáška).

15. ERSÁK, J. a POPOV A. Ekologické obráběcí kapaliny nové generace, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-142-9.
16. KOCMAN, K. Technologické procesy obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
17. Prezentácia firmy Schaeffler, spol. s r.o.. Teória procesu brúsenia.
18. GUERRINI, G.; LANDI, E.; PEIFFER, K.; FORTUNATO, K. Dry grinding of gears for sustainable automotive transmission production. *Journal of cleaner production*, ročník 176, 2018, s. 76 – 88, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.127>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261733086X>.
19. Prezentácia firmy Schaeffler, spol. s r.o.. Schaeffler Skalica spol. s.r.o.\_SK
20. <https://www.junker-group.com/cs/brousici-stroje/products/saturn/>
21. <https://www.atlantic-grinding-wheels.com/products/grinding-wheels/>
22. <https://www.diamantovekotouce.cz/diamantove-orovnavace-dle-din-1820-jung-42-12-1-10>



**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

| <b>Skratka</b> | <b>Popis</b>                        |
|----------------|-------------------------------------|
| <b>BK</b>      | brúsiaci kotúč                      |
| <b>RP</b>      | rotačný pohyb                       |
| <b>TP</b>      | translačný pohyb                    |
| <b>PV</b>      | pracovný vretenník                  |
| <b>BV</b>      | brúsiaci vretenník                  |
| <b>KBN</b>     | kubický nitrid bóru                 |
| <b>TOPV</b>    | tepelne ovplyvnená povrchová vrstva |

| <b>Symbol</b>              | <b>Jednotka</b> | <b>Popis</b>                            |
|----------------------------|-----------------|---|
| <b><math>v_c</math></b>    | $[m.s^{-1}]$    | rezná rýchlosť                          |
| <b>D</b>                   | $[mm]$          | priemer BK                              |
| <b>n</b>                   | $[min^{-1}]$    | počet otáčok BK                         |
| <b>d</b>                   | $[mm]$          | najväčší priemer BK                     |
| <b><math>v_s</math></b>    | $[m.s^{-1}]$    | obvodová rýchlosť BK                    |
| <b><math>v_o</math></b>    | $[m.min^{-1}]$  | obvodová rýchlosť obrobku pri RP        |
| <b><math>d_o</math></b>    | $[mm]$          | priemer obrobku                         |
| <b><math>n_o</math></b>    | $[min^{-1}]$    | počet otáčok obrobku                    |
| <b><math>v_{fa}</math></b> | $[mm.min^{-1}]$ | posuvová rýchlosť v axiálnom smere      |
| <b><math>v_{fr}</math></b> | $[mm.min^{-1}]$ | posuvová rýchlosť v radiálnom smere     |
| <b><math>v_{ft}</math></b> | $[mm.min^{-1}]$ | posuvová rýchlosť v tangenciálnom smere |
| <b><math>f_a</math></b>    | $[mm]$          | posuv v axiálnom smere                  |
| <b><math>f_r</math></b>    | $[mm]$          | posuv v radiálnom smere                 |
| <b><math>f_t</math></b>    | $[mm]$          | posuv v tangenciálnom smere             |
| <b>Ra</b>                  | $[μm]$          | drsnosť povrchu                         |

